

DOI: CNKI: 32. 1309. P. 20110911. 1132. 008

黄河三角洲地下水关键水盐因子及其植被效应

安乐生¹, 赵全升², 叶思源³, 刘贯群¹, 丁喜桂³

(1. 中国海洋大学环境科学与工程学院, 山东 青岛 266100; 2. 青岛大学环境科学系, 山东 青岛 266071;

3. 中国地质调查局青岛海洋地质研究所, 山东 青岛 266071)

摘要: 为了解黄河三角洲地下水生态环境功能, 采用数理统计、地统计和同位素方法及3S技术, 对“地下水-陆生植被”系统中关键水盐因子及其植被效应进行了深入研究。结果显示, 区域典型植被主要以埋深普遍较浅(1.0~3.0 m)的地下水为水源, 说明地下水是生态环境的敏感要素。潜水 $c(\text{Cl}^-)$ 与 $c(\text{TDS})$ 均呈显著的方向性空间变异(沿地下水流向二者浓度递增), 且二者具有空间分布一致性($R=0.999$), 表明 Cl^- 是潜水水质的主控离子。归一化植被指数(I_{NDVI})与潜水 $c(\text{Cl}^-)$ 间呈较显著的 Logistic 关系, 揭示潜水 $c(\text{Cl}^-)$ 是地下水这一生态环境敏感要素中的关键因子, 其对上覆植被强烈的胁迫和驱动作用引发了区域典型的生态环境效应。在黄河三角洲高效生态经济区的开发建设过程中, 应特别重视植被与潜水 $c(\text{Cl}^-)$ 间极为密切的作用与反作用关系, 积极采取有效的人为调控措施。

关键词: 地下水; 水文化学; 植被; 滨海地区; 黄河三角洲

中图分类号: X14 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-6791(2011)05-0689-07

温带气候区, 存在部分或全部依赖于地下水的生态系统(Groundwater Dependent Ecosystems, GDEs), 其依赖性(可用植被吸收的地下水量占总蒸腾蒸发量的百分比度量)呈现季节和年度变化^[1]。GDEs 所在区域地下水位的降低或抬升影响植被根系区土壤水分的时空分布, 会导致植物根系缺水或缺氧等现象的发生^[2]。这类地区地下水通过“饱和带-包气带-植被”间的垂向联系由点及面产生极为重要的生态环境效应。在干旱、半干旱地区, 植被分布与地下水蒸腾蒸发量之间有高度的相关性^[3], 而地下水通过蒸腾蒸发途径的排泄损失取决于水位埋藏深度, 又因这一地区(如我国西北干旱区等)地下水中矿化度的空间变异程度较小, 故其植被生长及生态演替常受地下水位控制^[4-5]。在近海地区, 植被生长受地下水盐分和水位的双重影响, 水位越浅、盐分越低, 则物种丰度及多样性越高^[6]。

黄河三角洲地区多种湿地并存、集中连片, 其生态脆弱, 环境敏感, 植被退化较为严重。因此, 自2008年以来, 黄河防总连续3年组织实施了基于汛前调水调沙的黄河下游生态调度, 对黄河河口三角洲湿地有计划地生态补水。该地区植被与环境要素或因子的研究侧重于水沙变化对湿地景观的影响^[7], 以及植被随地表水深、土壤含盐量^[8-9]和土壤水分^[10]的空间分异及其生态阈值等, 尚未从地下水生态环境功能和水分垂直循环角度开展深入研究。当前, 黄河三角洲地下水现状特征及其生态环境效应还缺乏系统认识, 为此, 本研究着眼于在垂向上与包气带及上覆植被有直接联系的潜水, 了解地下水位及潜水水化学典型特征, 阐明地下水关键水盐因子与植被间的相互关系, 为黄河三角洲高效生态经济区的开发建设和黄河下游生态调度等提供科学依据和管理思路。

收稿日期: 2010-12-06; 网络出版时间: 2011-09-11

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/32.1309.P.20110911.1132.008.html>

基金项目: 中国地质调查局大地调项目(1212010611402); 国家自然科学基金资助项目(40872167)

作者简介: 安乐生(1982-), 男, 安徽桐城人, 博士研究生, 主要从事水环境与水生生态研究。

E-mail: als00316@163.com

通信作者: 赵全升, E-mail: zqs0811@sina.com

1 研究区概况

研究区属于现代黄河三角洲范畴, 主要以现状海岸线和 1855 年古海岸线为界, 总面积约 2 877.7 km² (见图 1(a)), 包括东营市河口区和垦利县绝大部分行政区域, 含胜利油田主要勘探区及山东黄河三角洲国家级自然保护区。现代黄河三角洲属于小清河以北黄泛平原区, 受地貌、沉积物和构造条件制约, 该区浅层地下水主要赋存于第四系上部的冲积、海积层中的松散沉积物孔隙含水层中, 粉砂和粘土质粉砂是地下水的赋存介质。浅层地下水(埋深小于 60 m)可概化为浅层潜水-微承压水系统, 其中, 潜水含水层基底埋深平均约 8 m, 微承压含水层一般赋存于地面下 10~40 m。

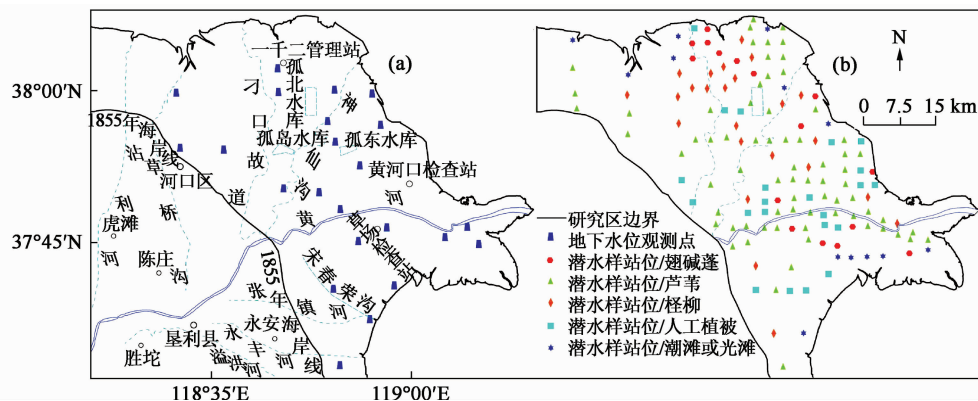


图 1 观测井和采样站位分布

Fig. 1 Distributions of monitoring wells and sampling stations

该区域主要植物种有翅碱蓬 (*Suaeda heteroptera*)、芦苇 (*Phragmites australis*)、柽柳 (*Tamarix chinensis*)、穗状狐尾藻 (*Mriophyllum spicatum*)、獐茅 (*Aeluropus littoralis var. sinensis*) 及补血草 (*Limonium sinense*) 等, 其中, 典型植被翅碱蓬、芦苇和柽柳分布较广。在东部自然保护区, 芦苇、柽柳和翅碱蓬沿河道向外至高潮线呈带状分布, 各植被带宽度大致为 0.5~4.0 km (翅碱蓬偏窄)、长度从入海口以上 5.0 km 沿河道至草场检查站约 45.0 km; 在北部自然保护区, 翅碱蓬、柽柳和芦苇自西北向东南呈块状集中分布, 各植被带宽度大致为 1.0~7.5 km, 长度约 10.5~22.0 km。研究区地表覆被呈现两条明显的生态演替系列, 即沿黄河现行河道纵向上由海向陆发育的“碱蓬-柽柳-獐茅/蒿草-耕地植被”和横向上由河道向两侧发育的“河道防护林/芦苇-獐茅/蒿草-天然柳林-耕地植被”, 两条演替系列在时空上交错分布, 且在东部自然保护区表现得尤为明显。

2 资料与方法

2.1 地下水位观测与数据处理

在研究区内布设地下水位观测井 23 眼, 采用 WS-1040 地下水动态自动监测仪采集枯水期 (2006 年 4 月) 和丰水期 (2006 年 8 月) 地下水位数据。利用 Surfer 8.0 软件绘制枯、丰水期地下水位等值线图, 插值方法为 Kriging, 并利用 Residual 命令在枯水期 Grid 文件中提取 151 个站位 (与下文潜水采样点对应) 的地下水位值。

2.2 样品采集与数据处理

2006~2008 年 10~11 月依年份次序, 有针对性地在区内采集潜水样 151 个 (采样时利用洛阳铲钻至潜水位下, 借助采水器提取水样 1 000 mL, 并记录地表覆被类型), 分析水样中 K^+ 、 Na^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 Cl^- 、 HCO_3^- 、 SO_4^{2-} 、 CO_3^{2-} 及溶解性总固体 (TDS) 含量, 测试工作由国家地质实验测试中心完成。借助 ArcGIS 9.2 软件地统计模块, 在数据检验的基础上, 采用 Ordinary Kriging 方法对 $c(TDS)$ 和 $c(Cl^-)$ 进行线性无偏插值, 得到二者的空间分布特征。同时, 选择上述潜水样 75 个, 并采集黄河水样 2 个、海水样 6 个、雨水样 3 个、植物样 76 个 (翅碱蓬 10 个、芦苇 42 个、柽柳 24 个), 对以上样品进行 δD 和 $\delta^{18}O$ 含量分析, 测试由中国地质科学院矿产资源研究所完成, 之后在 Origin 7.0 中完成相关图形绘制, 以了解植被水源。本研究观测井见图 1

(a)、采样站位及上覆植被见图 1(b)。

2.4 植被数据采集与处理

利用美国 Landsat-5 TM 影像数据 1 景, 包括 TM1 ~ TM7 共 7 波段, 分辨率为 30 m, 轨道号为 121/34, 成像时间为 2005 年 10 月 15 日(背景数据有 1:5 万地形图 1 幅), 通过 ENVI 软件提取研究区遥感影像的归一化植被指数(Normalized Difference Vegetation Index, I_{NDVI}), 同时利用 ArcGIS9.2 软件生成 I_{NDVI} 分级分布图, 并利用 ArcMap 中 Extract Values to Points 命令提取 151 个站位的 I_{NDVI} 值, 利用 1stOpt1.5 软件和 Origin7.0 软件对 151 组 I_{NDVI} 、地下水位和潜水 $c(Cl^-)$ 数据进行回归分析, 探讨 I_{NDVI} 与地下水位及潜水 $c(Cl^-)$ 间的定量关系。

3 结果分析

3.1 地下水位特征

受降水、蒸发和黄河汛前调水调沙(每年 6 月中下旬至 7 月中上旬间的 10 ~ 20 d)等影响, 现代黄河三角洲枯、丰水期地下水位呈现丰升、枯降的轻微波状起伏。其中, 枯水期水位埋深在 0.5 ~ 3.5 m, 平均值为 1.6 m; 丰水期水位埋深在 0.1 ~ 2.8 m, 平均值为 0.9 m。图 2 显示, 研究区地下水位埋深普遍较浅, 大部分地区为 1.0 ~ 3.0 m, 受地形地貌影响水位埋深总体由海向陆稳步增加。其中, 孤岛水库南侧的坡地与河滩高地地下水位较深, 大部分在 1.6 ~ 3.0 m; 洼地、滨海低地和潮间带水位埋藏较浅, 绝大部分小于 1.2 m; 而介于滨海低地和河滩高地间的低平地水位埋深主要在 1.2 ~ 2.0 m。沿地下水流向(黄河以北的潜水向北、东北径流, 黄河以南向南、东南径流) 地下水位埋深逐渐变浅, 一定程度上反映出由陆向海蒸发浓缩作用加剧。

3.2 潜水水化学特征

对 151 个潜水样的水化学参数进行统计分析(见表 1), 结果显示, 研究区潜水 $c(Cl^-)$ 和 $c(Na^+)$ 非常高, 其次是 $c(Mg^{2+})$ 、 $c(Ca^{2+})$ 和 $c(SO_4^{2-})$, 而 $c(K^+)$ 、 $c(HCO_3^-)$ 和 $c(CO_3^{2-})$ 非常低, 阴、阳离子浓度平均值大小顺序依次分别为: $Cl^- > SO_4^{2-} > HCO_3^- > CO_3^{2-}$ 、 $Na^+ > Mg^{2+} > Ca^{2+} > K^+$, 呈现海水入侵区地下水的典型特征。黄河河道两侧地下水受淡水补给最为充分, 且东部自然保护区最西端距海岸线较远, 海水入侵程度小, 因而在东部自然保护区最西端出现了 $c(Na^+)$ 、 $c(Cl^-)$ 和 $c(TDS)$ 最小值。刁口故道至 2010 年 6 月已停止行河 34 年, 故道入海口两侧存在开放式海岸(海边未筑防潮堤坝), 加之古河道发育地区表层沉积物粒度大, 形成了海水入侵的最有利通道, 故在北部自然保护区一千二管理站西侧出现 $c(Na^+)$ 、 $c(Cl^-)$ 和 $c(TDS)$ 最大值。对各水样主要离子毫克当量浓度百分比的分析可知, 研究区潜水由黄河现行河道两侧(地下水补给区)的 $Na^+ - Mg^{2+} - Ca^{2+} - Cl^- - SO_4^{2-}$ 、 $Mg^{2+} - Na^+ - Ca^{2+} - Cl^- - SO_4^{2-}$ 、 $Na^+ - Mg^{2+} - Cl^- - SO_4^{2-} - HCO_3^-$ 等复杂类型水快速过渡到 $Na^+ - Mg^{2+} - Ca^{2+} - Cl^-$ (或 $Mg^{2+} - Na^+ - Ca^{2+} - Cl^-$) 及 $Na^+ - Mg^{2+} - Cl^-$ 型水, 并在海岸滩涂区(排泄区)演化成 $Na^+ - Cl^-$ 这一简单类型的地下水。

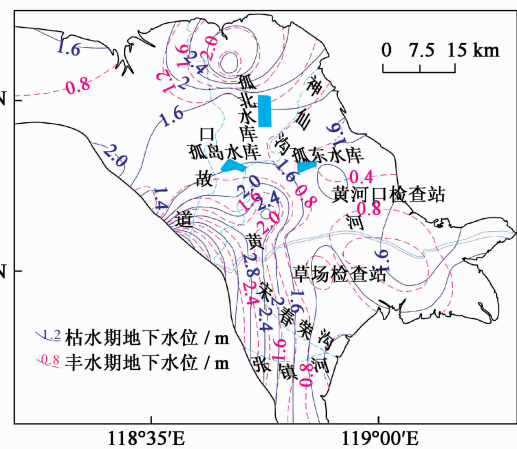


图 2 枯水期与丰水期地下水位比较

Fig. 2 Comparison of the groundwater tables in dry and wet seasons

表 1 潜水水质分析结果

mg/L

Table 1 Quality analysis of phreatic water

统计指标	K^+	Na^+	Ca^{2+}	Mg^{2+}	Cl^-	HCO_3^-	SO_4^{2-}	CO_3^{2-}	TDS
最大值	556.0	25 023.0	3 377.0	3 815.0	45 058.0	850.0	4 947.0	174.0	80 716.7
最小值	0.8	60.9	5.6	3.6	95.2	62.6	24.2	0.0	370.6
平均值	77.7	5 378.9	667.4	851.2	10 549.8	370.8	1 252.7	19.6	19 168.2
变异系数	1.5	0.9	0.9	0.8	0.9	0.5	0.8	1.4	0.8

水化学参数的相关性分析显示, $c(\text{Cl}^-)$ 、 $c(\text{Na}^+)$ 、 $c(\text{Mg}^{2+})$ 、 $c(\text{SO}_4^{2-})$ 与 $c(\text{TDS})$ 之间具有显著的正相关, 四大离子与 TDS 浓度间的相关系数均达到 0.9 以上, 为研究区潜水的主要组分。 $c(\text{Cl}^-)$ 与 $c(\text{TDS})$ 相关系数高达 0.999, 此外, $c(\text{Cl}^-)$ 与 $c(\text{Na}^+)$ 、 $c(\text{Mg}^{2+})$ 、 $c(\text{SO}_4^{2-})$ 之间也存在较高的相关性 (R 均大于 0.9), 说明 $c(\text{Cl}^-)$ 大小与空间分布对 $c(\text{TDS})$ 有着决定性作用。结合 $\gamma\text{Na}^+/\gamma\text{Cl}^-$ 等离子比例系数分析可知, 岩盐 (NaCl)、石膏 ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) 和白云石 ($\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$) 等矿物的风化溶解是该地区潜水 Na^+ 、 Mg^{2+} 、 Cl^- 、 SO_4^{2-} 等离子的主要来源。从补给区到排泄区各样点 $\gamma(\text{Na}^+ - \text{Cl}^-)/\gamma(\text{HCO}_3^- + \text{SO}_4^{2-} - \text{Mg}^{2+} - \text{Ca}^{2+})$ 值不同程度的接近于 1.0, 说明由陆到海均发生了阳离子交替吸附作用, 且排泄区由于多年海水入侵阳离子交换充分而相对减弱, 造成了区内潜水 $c(\text{Mg}^{2+})$ 含量普遍大于 $c(\text{Ca}^{2+})$ 。

从研究区潜水 $c(\text{TDS})$ 和 $c(\text{Cl}^-)$ 空间插值结果 (图 3 和图 4) 可以看出二者空间结构特征十分明显, 并呈现显著的方向性空间变异和空间分布一致性。这种方向性空间变异体现在, 由海向陆区域海水入侵程度的差异造成沿地下水流向二者浓度逐渐增大。潜水 $c(\text{Cl}^-)$ 和 $c(\text{TDS})$ 空间分布的一致性再次论证了二者之间具有极强烈的相关性, 进一步揭示了 Cl^- 是潜水水质的主控离子。

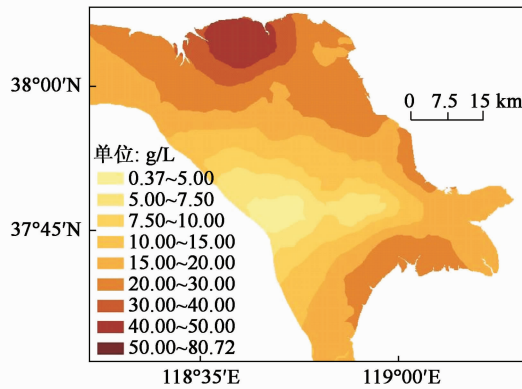


图3 潜水 $c(\text{TDS})$ 空间分布

Fig. 3 Spatial distribution of $c(\text{TDS})$ in phreatic water

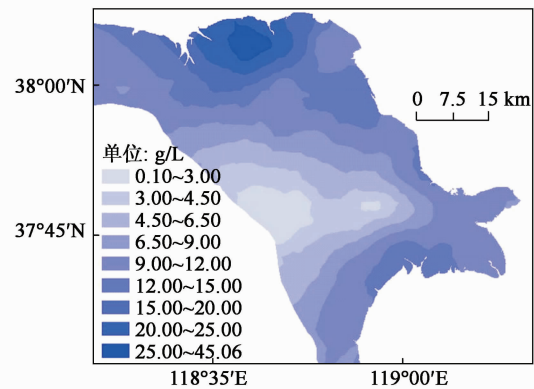


图4 潜水 $c(\text{Cl}^-)$ 空间分布

Fig. 4 Spatial distribution of $c(\text{Cl}^-)$ in phreatic water

3.3 典型植被水源分析

从不同水体和典型植被的 δD 和 $\delta^{18}\text{O}$ 关系图 (图 5) 可以看出, 研究区潜水的 δD 和 $\delta^{18}\text{O}$ 值分布较集中, 且介于黄河水、海水和雨水之间, 说明潜水为黄河水、海水和雨水的混合物。根据潜水 δD 和 $\delta^{18}\text{O}$ 值得出其直线方程为 $\delta\text{D} = 4.71\delta^{18}\text{O} - 13.72$, 该直线斜率明显低于我国东部大气降水线方程 $\delta\text{D} = 7.46\delta^{18}\text{O} + 0.90$ [11], 可知该地区蒸发比较严重。

研究区芦苇的 δD 与 $\delta^{18}\text{O}$ 值分布相对集中, 但翅碱蓬和怪柳的 δD 和 $\delta^{18}\text{O}$ 值分布较分散, 说明除地下水外还有其它因素影响翅碱蓬和怪柳的生长。翅碱蓬主要分布在平均海潮线以上的近海滩涂, 所在区域地下水位埋深很浅 ($< 1.0\text{ m}$), 其水源来自于受海水密切影响的潜水; 芦苇广泛分布于河口湿洼地和滨海沼泽地, 获取的水源主要是地下水通过蒸发作用形成的; 怪柳主要分布于潮上带以上, 其根系发达 (主根深 $1.0 \sim 2.0\text{ m}$), 能够从更深的地下水中汲取生长所需的水分, 并有可能与其周围沉积物发生较强的同位素交换作用 [12]。

综上所述, 研究区典型植被主要以不同深度或盐分特征的地下水为水源, 而地下水位和潜水 $c(\text{Cl}^-)$ 显

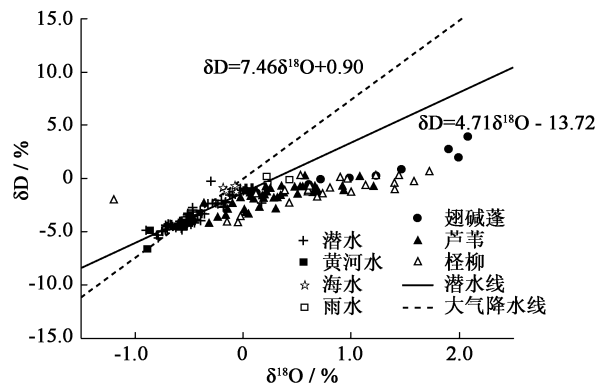


图5 不同水体和植被的 δD 和 $\delta^{18}\text{O}$ 关系

Fig. 5 Relationship between δD and $\delta^{18}\text{O}$ in different water bodies and vegetation

然是该区域地下水的两个关键环境因子, 不同程度地影响着植被的类型与空间分布格局。

3.4 地下水关键水盐因子及其植被效应

3.4.1 I_{NDVI} 与地下水位及潜水 $c(\text{Cl}^-)$ 的关系

图 6 显示(I_{NDVI} 小于 0.2 的区域主要是水域或光滩), 研究区 I_{NDVI} 高值区主要位于黄河现行河道和刁口故道两侧, 而近海地带特别是东南和东北部光滩和虾蟹池 I_{NDVI} 极低。 I_{NDVI} 沿地下水径流方向呈递减趋势, 与地下水位及潜水 $c(\text{Cl}^-)$ 在空间分布上具有高度相似性。结合 151 个点的地下水位与潜水 $c(\text{Cl}^-)$ 对 I_{NDVI} 的散点图, 经正态检验后剔除 21 个离群值(非黄河现行河道与故道两侧的个别采样点, 其所在区域由于地形地貌等因素产生库塘蓄水或洼地积水的淡水蓄积现象, 导致 $c(\text{Cl}^-)$ 和植被盖度的突变而出现离群值), 最终对 130 个点的相应数据进行回归分析, 结果如下:

$$I_{NDVI} = 0.03D - 8.88 \times 10^{-6}C + 0.37 \quad R^2 = 0.77, F = 455.9 > F_{0.01}(2, 127) = 4.60, P < 0.01 \quad (1)$$

$$I_{NDVI} = -16.19 + \frac{16.62}{1 + \left(\frac{C}{13444697.15}\right)^{0.67}} \quad R^2 = 0.75, F = 421.2 > F_{0.01}(1, 128) = 6.64, P < 0.01 \quad (2)$$

式中 D 为地下水位, m; C 为潜水 $c(\text{Cl}^-)$, mg/L; $F > F_{0.01}$ 、 $P < 0.01$ 表明回归方程显著。

研究区 I_{NDVI} 与地下水位及潜水 $c(\text{Cl}^-)$ 之间具有二元线性关系(见式(1)), R^2 为 0.77, 验证了地下水是生态环境的敏感要素。图 7 显示 I_{NDVI} 随潜水 $c(\text{Cl}^-)$ 的增加而递减, 并呈 Logistic 关系(见式(2)), 其 R^2 为 0.75, 显然, 式(2)的 R^2 较式(1)没有明显降低, 这进一步论证了潜水 $c(\text{Cl}^-)$ 是地下水这一生态敏感环境要素中的关键因子, 并引发了区域典型的生态环境效应。一方面由于该区地下水位埋深很浅, 蒸发作用强烈, 土壤积盐现象严重, 导致高浓度 Cl^- 对上覆植被生长发育产生胁迫作用; 另一方面 Cl^- 由海向陆浓度梯度的差异对表生植被的分布产生驱动作用, 区内典型的两条生态演替系列, 正是源于 Cl^- 在横向(以黄河为中心轴, 由河道向两岸)和纵向(由海向陆)上浓度梯度的显著空间变异所引起的。

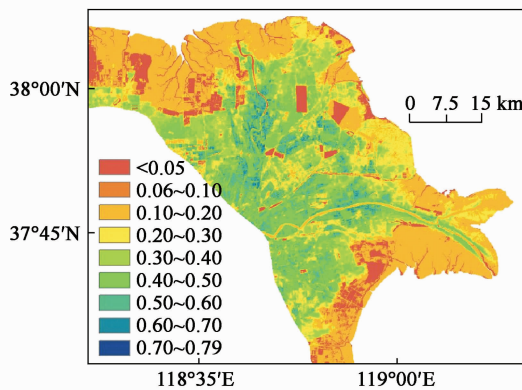


图 6 I_{NDVI} 空间分布

Fig. 6 Spatial distribution of I_{NDVI}

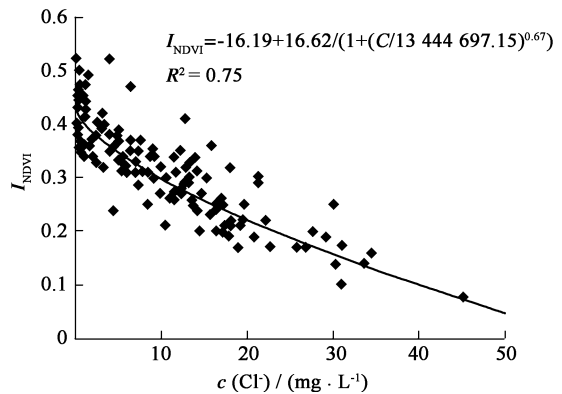


图 7 I_{NDVI} 与潜水 $c(\text{Cl}^-)$ 的关系

Fig. 7 Relationship between I_{NDVI} and $c(\text{Cl}^-)$ in phreatic water

3.4.2 植被与潜水 $c(\text{Cl}^-)$ 间的相互关系

研究区地下水常年作为重要水源支持植被的生长发育, 同时水中高浓度 Cl^- 又制约着植被的生长与分布。值得一提的是, 植被盖度也同样影响地下水 $c(\text{Cl}^-)$ 。破坏地表植被势必加剧蒸发与浓缩, 导致潜水 $c(\text{Cl}^-)$ 升高, 产生土壤次生盐渍化。因此, 该区域植被与潜水 $c(\text{Cl}^-)$ 间有极为密切的作用与反作用关系。研究区作为黄河三角洲高效生态经济区的核心区, 在其开发过程中首先应明白一个基本事实, 即在自然状态下, 海水入侵顶托和地表蒸发浓缩会导致潜水 $c(\text{Cl}^-)$ 不断上升, 土壤积盐将愈加严重, 并造成植被氯累积, 使其生长受到抑制, 直至产生更为严重的植株毒害症状, 乃至生态全面退化。因此, 该地区开发建设应特别重视潜水 $c(\text{Cl}^-)$ 与植被之间的相互作用关系与反馈调节机制, 积极采取有效的人为调控和管理措施。一方

面,应继续加大黄河下游调水调沙的力度,充分发挥生态调度的“压咸补淡”作用,严格控制潜水 $c(\text{Cl}^-)$;另一方面,需切实保护好现有植被,积极实施生态修复工程,减轻土壤盐渍化程度,克服土壤次生盐渍化。

3.4.3 影响植被生态的潜水 $c(\text{Cl}^-)$ 阈值

了解影响研究区典型植被的潜水 $c(\text{Cl}^-)$ 阈值,可为黄河下游生态调度和黄河三角洲滨海湿地生态修复等工程实施提供重要科学依据。151个采样站位中上覆植被类型为翅碱蓬、柽柳和芦苇的分别有16、24和71个,其中,翅碱蓬对应的潜水 $c(\text{Cl}^-)$ 区间为4.4~45.1 g/L(均值为21.6 g/L)、柽柳为0.6~33.7 g/L(均值为15.3 g/L)、芦苇为0.1~18.1 g/L(均值为6.5 g/L),将各植被类型潜水 $c(\text{Cl}^-)$ 按升序排列绘制成散点图(图8),剔除个别极值下的异常(少数个体对极端环境的耐受性),较为容易归纳出翅碱蓬、柽柳和芦苇适宜生长的潜水 $c(\text{Cl}^-)$ 范围分别为10.0~35.0 g/L、5.0~22.5 g/L和0.1~15.0 g/L,同时,可看出3种典型植被对高浓度 Cl^- 的适应能力为:翅碱蓬 > 柽柳 > 芦苇。

4 结 论

(1) 黄河三角洲地区地下水位埋深普遍较浅,大部分地区为1.0~3.0 m,其典型植被主要以不同深度或盐分特征的地下水为水源,说明地下水与植被间有着极为密切的水力联系,地下水是区域生态环境的敏感要素。

(2) 该区域潜水 $c(\text{Cl}^-)$ 与 $c(\text{TDS})$ 均呈现显著的方向性空间变异(沿地下水流向二者浓度逐渐增大),且二者具有空间分布一致性($R=0.999$),表明 Cl^- 是潜水水质的主控离子。 I_{NDVI} 与潜水 $c(\text{Cl}^-)$ 之间呈较显著的 Logistic 关系,而在增加1个自变量地下水位的情况下,新的回归方程 R^2 未出现明显增大,揭示潜水 $c(\text{Cl}^-)$ 是地下水这一生态环境敏感要素中的关键因子。区域潜水高浓度 Cl^- 对上覆植被具有强烈的胁迫和驱动作用,由此引发了典型的生态环境效应。

(3) 该地区典型植被翅碱蓬、柽柳和芦苇适宜生长的潜水 $c(\text{Cl}^-)$ 范围分别为10.0~35.0 g/L、5.0~22.5 g/L和0.1~15.0 g/L。在黄河三角洲高效生态经济区的开发建设过程中,应特别重视区域植被与潜水 $c(\text{Cl}^-)$ 间极为密切的作用与反作用关系,积极采取有效的人为调控和管理措施。

参考文献:

- [1] MILLER G R, CHEN X Y, RUBIN Y, et al. Groundwater uptake by woody vegetation in a semiarid oak savanna[J]. Water Resources Research, 2010, 46. W10503. [doi: 10.1029/2009WR008902]
- [2] BROLSMA R J, BEEK L P, BIERKENS M F. Vegetation competition model for water and light limitation: II: Spatial dynamics of groundwater and vegetation[J]. Ecological Modelling, 2010, 221(10): 1364-1377.
- [3] DOBLE R, SIMMONS C, JOLLY I, et al. Spatial relationships between vegetation cover and irrigation-induced groundwater discharge on a semi-arid floodplain, Australia[J]. Journal of Hydrology, 2006, 329(1/2): 75-97.
- [4] 周爱国, 马瑞, 张晨. 中国西北内陆盆地水分垂直循环及其生态学意义[J]. 水科学进展, 2005, 16(1): 127-133. (ZHOU Ai-guo, MA Rui, ZHANG Chen. Vertical water cycle and its ecological effect in inland basins, Northwest China[J]. Advances in Water Science, 2005, 16(1): 127-133. (in Chinese))
- [5] 庄丽, 陈亚宁, 李卫红, 等. 塔里木河下游柽柳 ABA 累积对地下水位和土壤盐分的响应[J]. 生态学报, 2007, 27(10): 4247-4251. (ZHUANG Li, CHEN Ya-ning, LI Wei-hong, et al. Responses of tamarix ramosissima ABA accumulation to groundwater level and soil salt changes in the lower reaches of Tarim River[J]. Acta Ecologica Sinica, 2007, 27(10): 4247-4251. (in Chinese))
- [6] ANTONELLINI M, MOLLEMA P N. Impact of groundwater salinity on vegetation species richness in the coastal pine forests and wetlands of Ravenna, Italy[J]. Ecological Engineering, 2010, 36(9): 1201-1211.

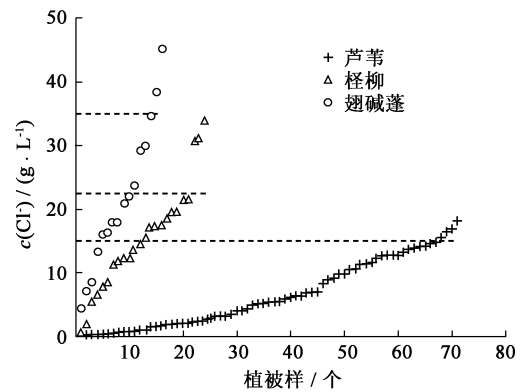


图8 典型植被样对应的潜水 $c(\text{Cl}^-)$

Fig. 8 Vegetation samples and its corresponding $c(\text{Cl}^-)$ in phreatic water

- [7] 李胜男, 王根绪, 邓伟, 等. 水沙变化对黄河三角洲湿地景观格局演变的影响[J]. 水科学进展, 2009, 20(3): 325-331. (LI Sheng-nan, WANG Gen-xu, DENG Wei, et al. Effects of runoff and sediment variation on landscape pattern in the Yellow River Delta of China[J]. Advances in Water Science, 2009, 20(3): 325-331. (in Chinese))
- [8] CUI B S, YANG Q C, ZHANG K J, et al. Responses of saltcedar (*Tamarix chinensis*) to water table depth and soil salinity in the Yellow River Delta, China[J]. Plant Ecology, 2010, 209(2): 279-290.
- [9] 赵欣胜, 吕卷章, 孙涛. 黄河三角洲植被分布环境解译及柽柳空间分布点格局分析[J]. 北京林业大学学报, 2009, 31(3): 29-36. (ZHAO Xin-sheng, LÜ Juan-zhang, SUN Tao. Relations between the distribution of vegetation and environment in the Yellow River Delta and SPPA for Chinese tamarisk spatial distribution[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2009, 31(3): 29-36. (in Chinese))
- [10] 谢涛, 杨志峰. 黄河三角洲芦苇湿地土壤水分安全阈值[J]. 水科学进展, 2009, 20(5): 683-688. (XIE Tao, YANG Zhi-feng. Safety threshold of soil water content for reed wetland in Yellow River Delta[J]. Advances in Water Science, 2009, 20(5): 683-688. (in Chinese))
- [11] 柳鉴容, 宋献方, 袁国富, 等. 中国东部季风区大气降水 $\delta^{18}\text{O}$ 的特征及水汽来源[J]. 科学通报, 2009, 54(22): 3521-3531. (LIU Jian-rong, SONG Xian-fang, YUAN Guo-fu, et al. Characteristics of $\delta^{18}\text{O}$ in precipitation over Eastern Monsoon China and the water vapor sources[J]. Chinese Science Bull, 2009, 54(22): 3521-3531. (in Chinese))
- [12] 王锦. 地质环境与植被分布模式的关系研究[D]. 北京: 中国地质大学, 2009: 44-52. (WANG Jin. The study of the relation between geological environment and plant distribution mode on the wetland of Yellow River Delta[D]. Beijing: China University of Geosciences, 2009: 44-52. (in Chinese))

Water-salt interactions factors and vegetation effects in the groundwater ecosystem in Yellow River Delta *

AN Le-sheng¹, ZHAO Quan-sheng², YE Si-yuan³, LIU Guan-qun¹, DING Xi-gui³

(1. College of Environmental Science and Engineering, Ocean University of China, Qingdao 266100, China;

2. Department of Environmental Science, Qingdao University, Qingdao 266071, China;

3. Qingdao Institute of Marine Geology, China Geological Survey, Qingdao 266071, China)

Abstract: To understand the function of the groundwater ecosystem in Yellow River Delta, some key aspects in the evaluation of terrestrial vegetation-groundwater interactions are examined using an integrated approach combining statistical, geostatistical, isotope, and 3S (GPS, GIS, RS) techniques. The examination focuses on the role of water-salt interactions and vegetation effects in the groundwater ecosystem. The results show that the shallow groundwater zone (1.0–3.0 m) in the study area is the main water source, indicating the crucial role of groundwater in the ecosystem. Both chloride ion concentration ($c(\text{Cl}^-)$) and the total dissolved solids content ($c(\text{TDS})$) in phreatic water present the characteristic of directional variability in space, or increasing along the direction of groundwater flow. The spatial distributions of $c(\text{Cl}^-)$ and $c(\text{TDS})$ are highly consistent with each other ($R=0.999$), showing that the quality of shallow groundwater is dominated by Cl^- . The logistic relationship between Normalized Difference Vegetation Index (I_{NDVI}) and $c(\text{Cl}^-)$ in phreatic water reveals that the later is a curial control factor of groundwater in relation to the vegetation cover on land surface. It is therefore suggested that special attentions should be paid on the close relationship between vegetation and $c(\text{Cl}^-)$ in phreatic water in development of the Yellow River Delta High-efficiency Ecological Economic Zone, and the effective artificial regulation measures should be adopted to protect the ecosystem.

Key words: groundwater; hydrochemistry; vegetation; coastal zones; Yellow River Delta

* The study is financially supported by the Geological Survey Project of China Geological Survey (No. 1212010611402) and the National Natural Science Foundation of China (No. 40872167).